



Istituto per l'Ambiente Marino Costiero

IAMC – CNR

U.O.S. DI CAPO GRANITOLA

Studio di fattibilità

Sistema per il monitoraggio in continuo del particolato emesso dal
camino di un impianto FCC CO-Boiler di una Raffineria

Fabio D'Agostino, Anna Lisa Alessi, Mario Sprovieri, Salvatore Mazzola

INDICE

- 1. Premessa**
- 2. L'impianto FCC CO Boiler**
- 3. Descrizione del sopralluogo**
- 4. Tecniche di monitoraggio in continuo delle polveri da emissioni convogliate**
 - 4.1 UNI EN 13284-1:2003 - Determinazione della concentrazione in massa di polveri in basse concentrazioni. Metodo gravimetrico
 - 4.2 Misure indirette estrattive in discontinuo
 - 4.3 Misure indirette in continuo. Generalità
 - 4.3.1 Opacimetro
 - 4.3.2 Diffrazione per diffusione frontale della luce (forward Scattering)
 - 4.3.3 Diffrazione per retro-diffusione della luce (Back Scattering)
 - 4.3.4 Sonda triboelettrica
 - 4.3.5 Sonda Elettrodinamica
 - 4.3.6 UNI EN 13284-2:2005: Determinazione della concentrazione in massa di polveri in basse concentrazioni. Sistemi di misurazione automatici
 - 4.3.7 UNI EN 14181:2005: Assicurazione della qualità di sistemi di misurazione automatici.
- 5. Strumenti in commercio adatti all'uso**
 - 5.1 *Condizioni fluidodinamiche del camino*
 - 5.2 *Granulometria del particolato emesso dal camino*
 - 5.3 *Parametri di progetto*
- 6. Studio di fattibilità**
 - 6.1 *Fattibilità tecnica*
 - 6.1.1 *Sonde elettrodinamiche*
 - 6.1.2 *Sonda Laser Scattering in diffrazione frontale*
 - 6.1.3 *Ottenimento della QAL2*
 - 6.1.4 *Conclusioni sulla fattibilità tecnica*
 - 6.2 *Fattibilità economica*
- 7. Conclusioni**

1. Premessa

L'IAMC-CNR nello svolgimento delle proprie attività ha svolto uno studio di fattibilità finalizzato alla realizzazione di un apparato per il monitoraggio in continuo del particolato emesso dal camino di un impianto FCC CO-BOILER di una raffineria.

Questo studio di fattibilità nasce dalla richiesta della Commissione IPPC (Integrated Pollution Prevention and Control) di implementare tale sistema di monitoraggio nel Piano di Monitoraggio e Controllo (PMC) per l'ottenimento dell'AIA.

2. L'impianto FCC CO Boiler

I processi di raffinazione del petrolio greggio sono volti principalmente alla produzione per distillazione di gas metano, gas di petrolio liquefatto, benzine, kerosene, gasoli, oli combustibili, altre frazioni più pesanti e più alto bollenti. Durante questo processo di distillazione si ha quindi che in testa alla colonna di distillazione (*Topping*) si hanno i composti più basso bollenti ed in coda quelli più alto bollenti. Questi ultimi sono maggiormente utilizzati per la produzione di asfalto e rappresentavano un prodotto di bassa qualità.

Negli ultimi decenni, con lo scopo di aumentare la produzione verso i combustibili per locomozione, e per bilanciare la produzione di benzina e gasolio a seconda della richiesta, si è implementato nella pianta dei processi di raffinazione un impianto chiamato *Fluid Catalytic Cracking* (FCC) che ha lo scopo di convertire gli idrocarburi pesanti in leggeri (tipo benzine ad elevato numero di ottani).

Questa tecnica di conversione di molecole pesanti in molecole leggere avviene ad opera di catalizzatori che ne favoriscono la reazione a pressione atmosferica e a temperature di circa 650 – 750 °C.

Affinché le suddette reazioni avvengano, con buon grado di conversione, si deve assicurare un intimo contatto tra i composti idrocarburici e il catalizzatore, una corretta fluidificazione e miscelazione del catalizzatore con gli idrocarburi, una corretta temperatura.

Il catalizzatore dopo aver reagito con gli idrocarburi deve essere rigenerato in quanto step dopo step diminuisce la sua reattività anche a causa della deposizione di

particelle di carbon coke che ne ostruiscono i siti attivi. La reazione di rigenerazione del catalizzatore avviene in un secondo reattore detto di rigenerazione.

Pertanto, nel reattore di cracking si produce gas combustibile, propano, propilene, butano, butilene, isobutano, benzine ad alto numero di ottani, gasolio, gasolio pesante chiarificato e coke; nel reattore di rigenerazione si ha, come già detto, la riattivazione del catalizzatore per combustione del carbon coke con aria calda e la conseguente formazione di monossido di carbonio (CO) e anidride carbonica (CO₂).

Quest'ultima reazione è del tipo esotermica ed il calore sviluppato viene recuperato per riscaldare la miscela nel reattore di cracking. Il CO essendo altamente tossico non può essere rilasciato in atmosfera ragione per cui tutta la corrente gassosa prodotta in questo reattore viene inviata ad un Boiler dove si ha una ulteriore reazione di combustione del CO a CO₂ per mezzo di aria calda.

Nel corso del processo di rigenerazione, inoltre, si ha anche la formazione di piccole particelle solide di catalizzatore che vengono trascinate dalla corrente gassosa. La maggior parte di queste particelle solide vengono recuperate da appositi filtri a ciclone e riusate nello stesso processo. Pertanto, dopo un certo periodo di tempo, la granulometria del catalizzatore va via via diventando sempre più fine sino a divenire ingestibile. Per questo motivo si ha la necessità di integrarlo con del catalizzatore nuovo in modo da assicurare una distribuzione granulometrica omogenea nel tempo e una efficacia costante nel tempo.

Conseguenza della riduzione granulometrica del catalizzatore comporta che una piccola frazione molto fine non è trattenuta dai filtri e viene trascinata dalla corrente gassosa sino al CO Boiler ed espulsa in atmosfera. Questa frazione costituisce, per la maggior parte, il particolato totale sospeso (PTS) emesso dal camino.

La quantità di PTS è regolamentata dal Testo Unico Ambientale - D.Lgs 152/06 e s.m.i. - e soggetta ai parametri richiesti per l'ottenimento dell'autorizzazione allo scarico in atmosfera nell'Autorizzazione Integrata Ambientale.

Il Ministero dell'Ambiente per la Tutela del Territorio e del Mare (MATTM) per impianti di questa tipologia ha dettato come concentrazione media giornaliera ammissibile per lo scarico in atmosfera 40 mg/Nmc.

Per tale scopo è richiesto a tutti i gestori di impianti che scaricano in atmosfera di dimostrare, in autocontrollo, che questo parametro, insieme a tanti altri, venga rispettato durante il ciclo di vita dell'impianto.

Per tale motivo è stato richiesto all'IAMC-CNR di effettuare uno studio di fattibilità per sviluppare un metodo per il monitoraggio in continuo delle polveri emesse da un camino CO Boiler.

3. Descrizione del sopralluogo

Per lo svolgimento di questo compito ci si è recati presso la Raffineria per constatare lo stato del camino e per acquisire, dal personale tecnico, tutte le informazioni necessarie inerenti sia il processo *Fluid Catalytic Cracking (FCC) CO-Boiler* sia le condizioni fluidodinamiche dei fumi emessi dal camino.

In quella occasione ci si è recati sino alla quota di calpestio dove installare il sistema di monitoraggio delle polveri e si è verificata la presenza di diversi punti d'ispezione e presa del campione per mezzo di raccordi flangiati. Si è rilevato anche la presenza di sonde atte alla misurazione della portata, della temperatura, dell'O₂ e tutte le sonde per il sistema di monitoraggio delle emissioni gassose (SME).

Successivamente i tecnici della raffineria hanno spiegato i processi chimici e fisici che stanno alla base di un impianto *FCC CO-Boiler* delineando il percorso del letto fluidizzato, illustrando il processo di recupero/rigenerazione del catalizzatore. Hanno pertanto illustrato il layout d'impianto, la tipologia e granulometria media del catalizzatore attualmente in uso, evidenziando la costante e necessaria reintegrazione del catalizzatore a causa della perdita per trascinamento nei fumi o di efficacia.

4. Tecniche di monitoraggio in continuo delle polveri da emissioni convogliate

I sistemi di monitoraggio in continuo delle emissioni (SME), effettuato mediante l'impiego dei Sistemi di Misura Automatici (AMS), rivestono un ruolo importante nella gestione degli impianti industriali assicurando, nelle diverse fasi della vita di un impianto, un efficace monitoraggio in continuo che può essere finalizzato, oltre che al controllo dei

parametri di impianto, alla verifica del rispetto delle concentrazioni limite delle sostanze emesse in ambiente e prescritte dalle autorità preposte.

Una serie di norme tecniche di notevole importanza sono state introdotte per raggiungere una gestione moderna ed efficace, anche dal punto di vista ambientale, degli impianti industriali.

A tale scopo sono state redatte le linee guida SME che indicano per ogni inquinante quale principio di misura sia da ritenersi idoneo. Di seguito si riporta una scheda dove vengono elencati gli inquinanti emessi in atmosfera che le industrie devono monitorare in continuo per l'ottenimento dell'Autorizzazione Integrata Ambientale.

Scheda 1: Elenco degli inquinanti da monitorare e dei principi di misura idonei

Inquinante	Principio di Misura
PTS - materiale particellare	estinzione di luce
	diffrazione di luce
	estinzione di raggi beta
	misure radiometriche
	dispersione di luce a raggio laser
CO - monossido di carbonio	spettrometria NDIR (non dispersive infrared)
	spettrometria FTIR (Fourier transform infrared)
NO _x - ossidi di azoto	chemiluminescenza
	spettrometria NDIR
	spettrometria FTIR
	spettrometria NDUV (non dispersive ultraviolet)
SO ₂ - ossidi di zolfo	spettrometria NDIR
	spettrometria FTIR
	spettrometria NDUV
HCl - acido cloridrico	spettrometria FTIR
	elettrochimico a ioni selettivi
HF - acido fluoridrico	spettrometria FTIR
	elettrochimico a ioni selettivi
COV - composti organici volatili	FID (Flame Ionization Detector)
NH ₃ - ammoniaca	spettrometria FTIR
	chemiluminescenza

Per la misura dei parametri di processo si possono adottare le seguenti tecniche:

Scheda 2: Parametri di processo

Temperatura (°C)	Termometria
Umidità (% v/v)	FTIR
	Ossimetria differenziale
Pressione (mbar)	Misuratori di pressione
Velocità dei fluidi (m/s)	Anemometria
	Pitot
	Venturi
Ossigeno (% v/v)	Celle ad ossido di zirconio
	Paramagnetismo

Le linee guida precisano inoltre che possono essere utilizzati altri principi e tecniche di misura, purché di provata affidabilità e/o di equivalenza alle metodiche Ufficiali e Normate.

Per il caso del controllo delle emissioni delle polveri le norme a cui devono attenersi le strumentazioni affinché le misure possano essere validate sono:

UNI EN 13284-1:2003: Determinazione della concentrazione in massa di polveri in basse concentrazioni. Metodo gravimetrico;

UNI EN 13284-2:2005: Determinazione della concentrazione in massa di polveri in basse concentrazioni. Sistemi di misurazione automatici;

UNI EN 14181:2005: Assicurazione della qualità di sistemi di misurazione automatici.

Di seguito verranno discusse le tecniche strumentali, generalmente più usate, per la misurazione delle polveri distinguendole in misure dirette estrattive, misure indirette estrattive e in discontinuo, misure indirette in continuo.

4.1 *UNI EN 13284-1:2003 - Determinazione della concentrazione in massa di polveri in basse concentrazioni. Metodo gravimetrico*

Il metodo UNI EN 13284-1:2003, è un *metodo diretto* di misura delle polveri, ed è sia il metodo ufficiale utilizzato dall'ARPA durante i controlli sulle emissioni convogliate sia il metodo di riferimento per calibrare tutte quelle strumentazioni che necessitano di una

calibrazione per correlare l'unità di misura quantificata in situ e in continuo con la quantità in peso delle polveri emesse per Nm³.

Questo metodo è del tipo estrattivo ossia la misura viene effettuata prelevando un campione dei fumi a mezzo di una pompa collegata al camino con un apposito raccordo flangiato. Questo prelievo avviene in condizioni di isocinematismo, ossia equiparando la velocità dei fumi nel camino con la velocità dei fumi campionati nel canale di aspirazione e ciò è assicurato da una pompa capace di regolare la sua portata di aspirazione.

Inoltre per ottenere il valore della concentrazione delle polveri nei fumi secchi, bisogna misurare contemporaneamente la temperatura, l'ossigeno percentuale residuo e l'umidità percentuale.

L'O₂ % residuo, negli impianti termici, rappresenta la quantità di aria immessa in camera di combustione e di conseguenza la quantità di O₂ residuo e consumato per la totale ossidazione dei composti comburenti. Questo parametro è dettato dal legislatore in funzione dell'impianto/processo ed è un valore a cui normalizzare le concentrazioni degli inquinanti nei fumi.

La formula finale per ricavare la concentrazione delle polveri (P°) nei fumi secchi riferita al 3% di O₂, come nel caso in specie, e alla temperatura di 273,15 K, è:

$$P^{\circ} = P \times \frac{(21 - O2\ rif)}{(21 - O2\ mis)} \times Kt \times Ku$$

dove

O2 rif e *O2 mis* sono rispettivamente l'ossigeno di riferimento e misurato (%vol);

$$Kt = \frac{273,15 + T\ mis}{273,15}$$

T mis è la temperatura misurata (°C);

$$Ku = \frac{100}{100 - U\ mis}$$

U mis è la quantità percentuale dell'volume d'acqua misurato nei fumi (%vol).

I fumi campionati/prelevati dal camino attraversano il sistema di filtraggio composto da un setto poroso dove viene alloggiata una membrana di 47 mm (generalmente di PTFE o fibre di Quarzo) con diametro dei pori di circa 0,45 μm nella quale si deposita il materiale solido. Di seguito, la membrana viene pesata in una bilancia analita, ad almeno 5 cifre decimali del grammo e si misura la quantità in peso delle particelle raccolte per differenze di peso con il filtro pesato prima dell'utilizzo.

La quantità è espressa generalmente in mg o in μg su Nm^3 dove il suffisso *N* indica le condizioni *Normali* ossia, come già detto, riferite a $T = 273,15 \text{ K}$.

Qualora invece si vogliano misurare le frazioni granulometriche PM₁₀, PM₄, PM_{2,5}, PM₁, ossia la quantità delle particelle con diametro minore di 10, 4, 2,5, o 1 μm , si monta una apposita testa filtrante con setti porosi delle opportune dimensioni.

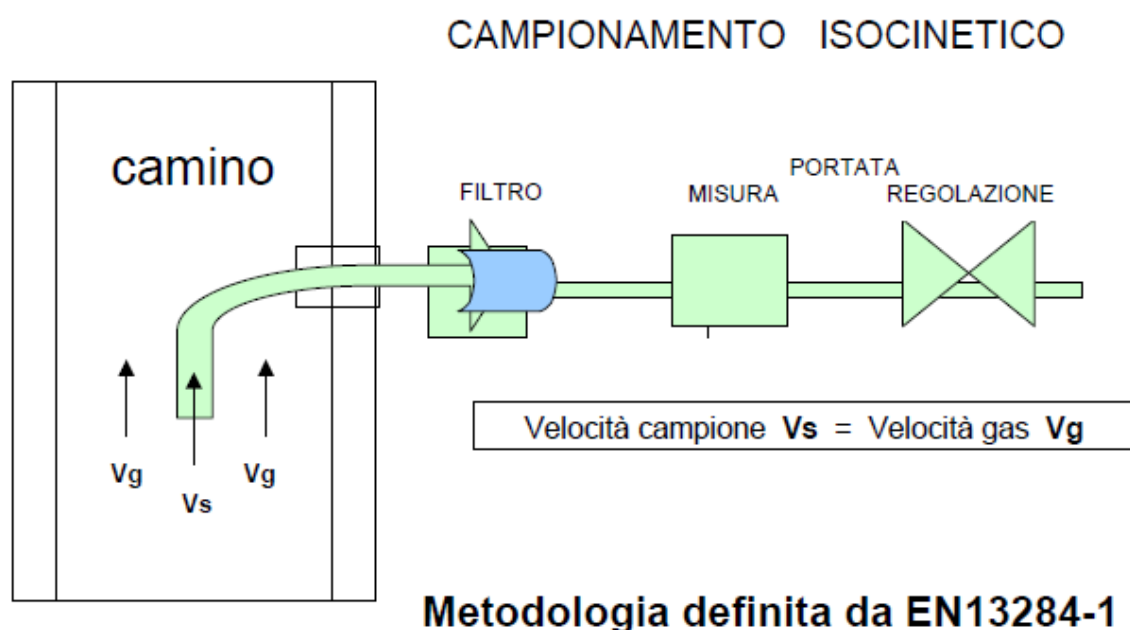


Figura 2: Schema del principio di funzionamento di una misurazione delle polveri secondo il metodo UNI

4.2 Misure indirette estrattive in discontinuo

Le *misure indirette con metodi estrattivi*, sono quelle che usano sistemi automatici di campionamento, sempre in condizioni di isocinematismo, dove il numero di campioni da

eseguire è programmabile nell'arco delle 24 ore e pertanto può definirsi una misura in continuo seppur discretizzata nel tempo.

Questo metodo è spesso impiegato per la caratterizzazione costante di fumi acidi e/o molto umidi. A tale scopo si usano membrane filtranti a nastro, dove si raccoglie il materiale particellare e analizzatori a raggi β per determinare la quantità depositata.

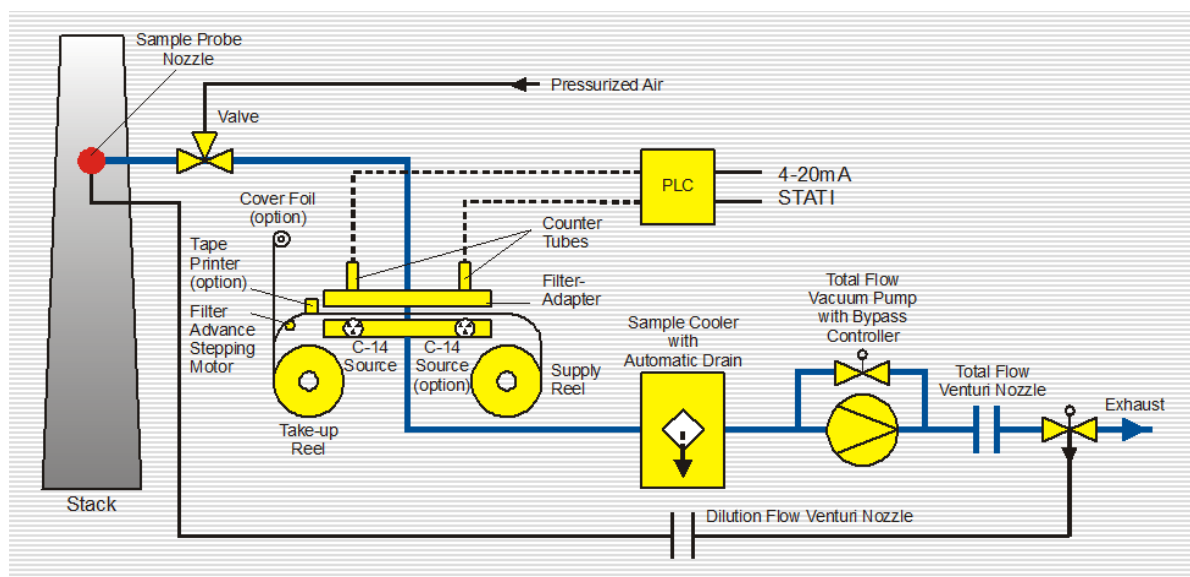


Figura 3: Schema di un sistema automatico di campionamento e misura delle polveri con rivelatore per estinzione di raggi β

4.3 Misure indirette in continuo. Generalità

Le *misure indirette*, in continuo e in real-time senza prelievo del campione, sono quelle per cui, mediante la misurazione di una grandezza fisica diversa da quella ponderale, e pertanto ottenuta senza la raccolta del materiale particellare in un filtro, si risale alla quantità in peso per mezzo di opportune calibrazioni atte a correlare queste due grandezze.

Questi metodi sono spesso impiegati laddove è strettamente richiesto un monitoraggio in continuo, per esempio a scopo di controllo nei diversi stadi dei processi industriali o, così come dettato dal D.lgs 152/06, per controllo delle emissioni in atmosfera dai camini di impianti di combustione per produzione di energia con unità termiche di potenza maggiore di 6 MW, da forni di raffinerie di petrolio greggio e di gas, ecc.

Le linee guida SME indicano quali metodi efficaci per la misura in continuo del particolato nei fumi quelli per: estinzione di luce, diffrazione di luce, dispersione di luce, a sorgente luminosa tipo a raggio laser di opportuna lunghezza d'onda.

Il principio di queste tecniche analitiche è basato sulla capacità di un corpuscolo, con diametro (aerodinamico) maggiore della lunghezza d'onda della luce emessa, di diffondere, diffrangere, assorbire la luce.

Questi strumenti sono generalmente composti da: una sorgente luminosa; un rilevatore del tipo fotodiodi; un foto moltiplicatore; un logger per la registrazione del dato misurato in funzione del tempo.

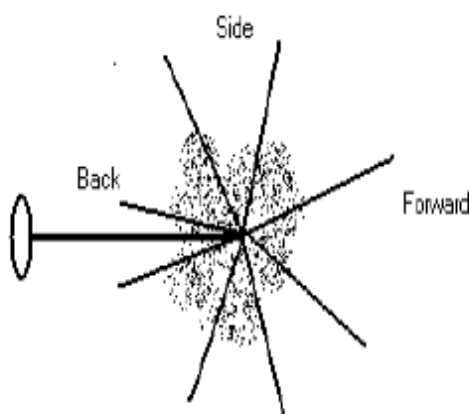


Figura 4: Schema della diffrazione della luce da parte di una particella solida

4.3.1 Opacimetro

Negli opacimetri la sorgente luminosa generalmente è un laser che può essere a lunghezza d'onda fissa o modulabile e, in quest'ultimo caso, si parla di opacimetri dinamici. Il rilevatore è posto di fronte e osserva un'attenuazione dell'intensità luminosa del fascio incidente ogni qualvolta il particolato ne ostruisce il passaggio.

La misura che si ottiene è espressa come Trasmittanza ed è pari al rapporto tra l'intensità della luce misurata " I " e l'intensità della luce quando attraversa il fluido privo di materiale assorbente " I_0 "; dalla trasmittanza " T " si ottiene l'Opacità " O "

$$T \% = I/I^{\circ} \times 100$$

$$O = (100 - T) \%$$

L'attenuazione del fascio di luce può anche essere espresso come estinzione in applicazione della legge di Lambert

$$I = I^{\circ} \times e^{-kcl}$$

dove “*k*” è costante di estinzione, “*c*” è la concentrazione delle polveri, “*l*” è il cammino ottico.

Gli opacimetri sono efficacemente impiegati nei camini dove le concentrazioni di polveri sono dell'ordine 0,1 grammi per m³ e hanno velocità minori di 3 m/s.

Sono altresì inefficaci quando le concentrazioni delle polveri sono dell'ordine delle decine del milligrammo per m³ e quando le velocità delle particelle sono maggiori di 3 m/s.

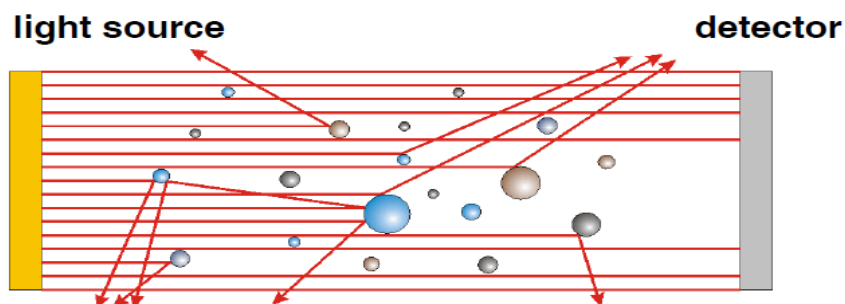


Figura 5: Schema del principio di funzionamento di un opacimetro (a sx la sorgente a dx il rilevatore)

4.3.2 Diffrazione per diffusione frontale della luce (forward Scattering)

Gli strumenti analitici usati per la misurazione delle polveri con il metodo per diffrazione frontale, al contrario dei suddetti opacimetri, possono essere impiegati laddove le polveri sono in bassa concentrazione e le velocità anche maggiori di 5 m/s.

Il principio di funzionamento è basato sulla capacità dei corpuscoli, non solo di assorbire, ma di diffrangere la luce in diverse direzioni del fascio primario.

Nella configurazione per diffusione frontale il rilevatore è posizionato dal lato opposto alla sorgente, a pochi gradi di distanza dal centro focale del laser, e non rileva una diminuzione dell'intensità della luce emessa, come nel caso degli opacimetri, ma un aumento dell'intensità luminosa quando il fluido gassoso contiene particelle solide che diffrangono la luce.

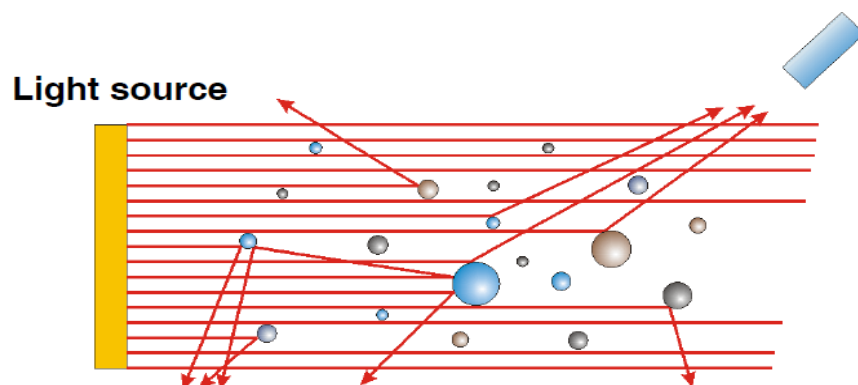


Figura 6: Schema del principio di funzionamento di un opacimetro (a sx la sorgente, in alto a dx il rilevatore)

4.3.3 Diffrazione per retro-diffusione della luce (Back Scattering)

Gli strumenti di misura per retro-diffusione hanno lo stesso principio di funzionamento di quelli per diffusione frontale con la sola differenza che il rilevatore è posto a circa 180° dalla sorgente luminosa. Pertanto il rilevatore e la sorgente stanno dallo stesso lato del canale o camino.

L'applicazione di questa tecnica per diffrazione della luce è tipica anche dei granulometri laser da banco che vengono impiegati per la caratterizzazione delle dimensioni delle particelle, disperse in un fluido, con diametro che va dai decimi al centinaio dei micrometri.

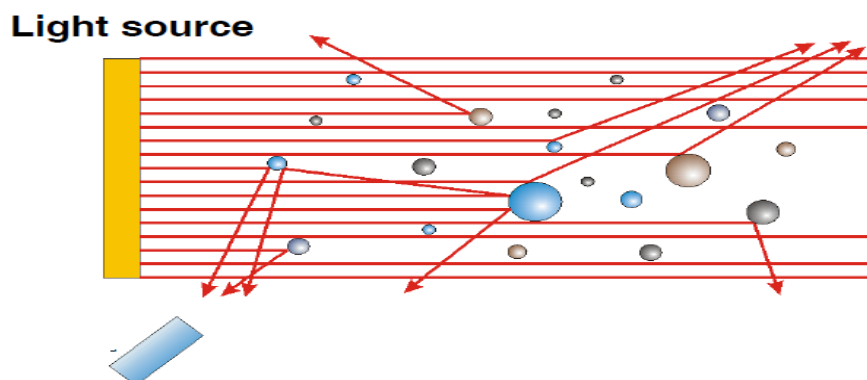


Figura 7: Schema del principio di funzionamento di un opacimetro (a sx la sorgente, in basso a sx il rivelatore)

4.3.4 Sonda triboelettrica

La *sonda triboelettrica* è uno strumento usato per la misura delle polveri emesse da camini e, per lo più, per il controllo dei filtri a manica. Il principio di funzionamento della sonda si basa sull'effetto causato dallo sfregamento/impatto di particelle elettricamente cariche, e trasportate dai fumi, contro la superficie della sonda/elettrodo quando è posta all'interno della zona di misura.

Particolari circuiti elettronici, alloggiati all'interno della sonda, permettono infatti di trasformare l'elettricità statica prodotta da questo fenomeno in un segnale elettrico amplificato e proporzionale alla quantità di particelle che l'hanno generato.

La sensibilità di una sonda triboelettrica è dell'ordine dei 1 mg/m³ di polveri, ed è influenzata dalla natura delle polveri, dalla concentrazione, dalla velocità del gas nel condotto, della lunghezza della sonda.

La sonda pertanto rileva la concentrazione delle particelle solide presenti nei gas convertendo tale fenomeno fisico in un segnale elettrico, 4÷20 mA, proporzionale al grado di polverosità. La corrente generata viene espressa come segue:

$$I = (k \times M \times V \times a) / d$$

dove

I = corrente generata (A); M = flusso di massa del particolato (kg/sec); V = velocità del gas (m/sec); K = costante dipendente dal tipo di materiale particellare; a = costante sperimentale (compresa tra 1.4 e 1.9); d = diametro aerodinamico equivalente delle particelle (m).

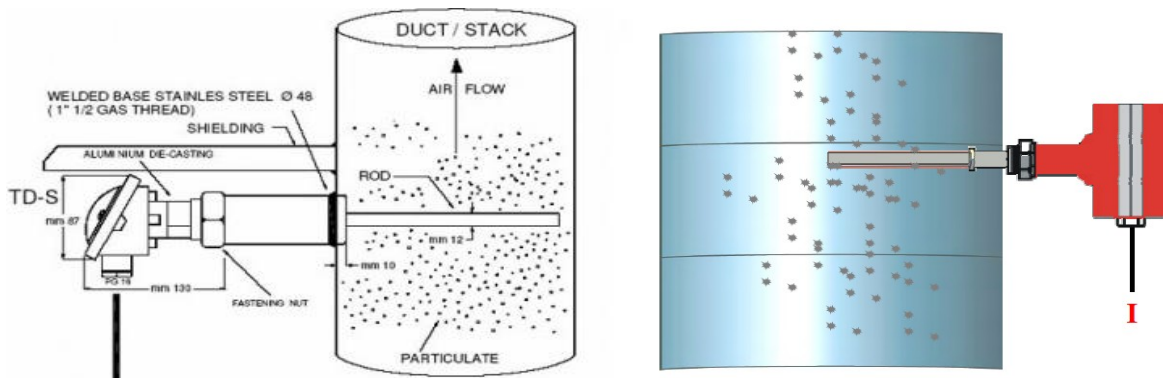


Figura 8: Schema del principio di funzionamento della sonda triboelettrica

4.3.5 Sonda Elettrodinamica

La sonda elettrodinamica è un altro strumento atto alla misurazione della concentrazione delle polveri in camini il cui principio di funzionamento sta nella capacità di registrare una variazione di frequenza della corrente indotta dalle particelle cariche che passano vicino all'elettrodo posto all'interno del condotto/camino.

Quest'ultima tecnica è usata con un buon successo quando le particelle hanno velocità maggiore di 5 m/s e, quando la velocità si mantiene sopra gli 8 m/s, le differenze di velocità delle particelle che si possono avere nei diversi momenti di funzionamento dell'impianto, non influenzano la correlazione con la quantità di particelle (vedi fig. 9).

A differenza della sonda triboelettrica quella elettrodinamica inoltre non è molto influenzata né dalla tipologia delle particelle, seppur vi è una certa dipendenza dettata dalla capacità delle particelle di caricarsi elettrostaticamente,

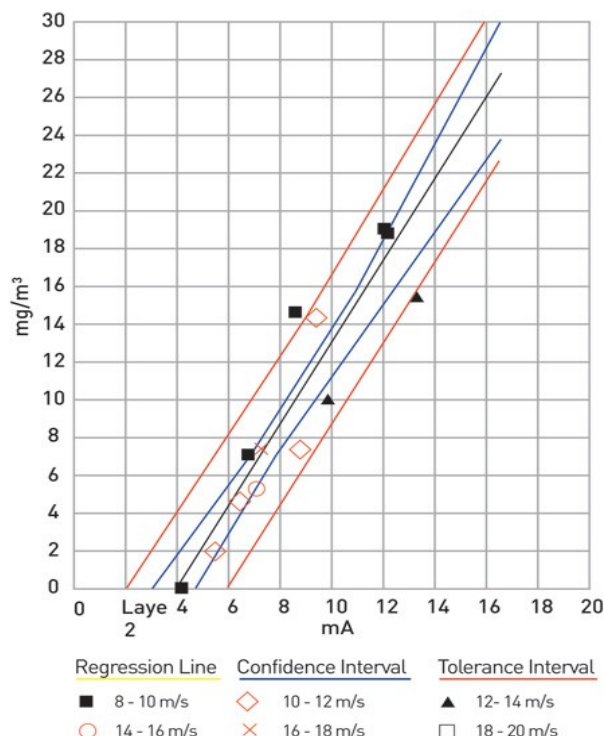


Figura 9: regressione lineare, intervallo di confidenza, intervallo di tolleranza, in funzione della velocità delle particelle

né tanto meno dallo sporco che si accumula sull'elettrodo. Inoltre la sensibilità è prossima a $0,01 \text{ mg/m}^3$ e il range di misura va da $0,1 \text{ mg}$ a 1000 mg/m^3 .

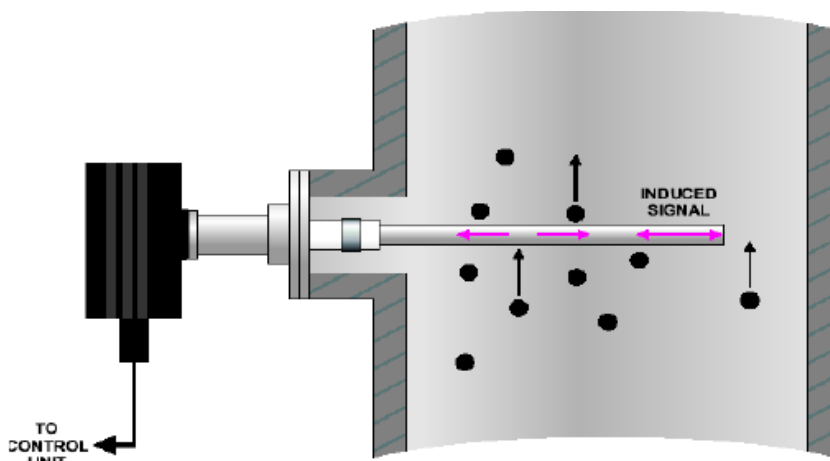


Figura 10: Schema di funzionamento di una sonda elettrodinamica

4.3.6 UNI EN 13284-2:2005: Determinazione della concentrazione in massa di polveri in basse concentrazioni. Sistemi di misurazione automatici.

La norma specifica le caratteristiche di un sistema di misura automatico (AMS) e in continuo delle polveri. Questa deriva dalla UNI EN 14181, che costituisce un documento generale sull'assicurazione di qualità, e in connessione con essa va applicata e con il metodo standard di riferimento descritto nella la EN 13284-1.

La norma specifica i criteri di prova da applicare ai sistemi di misura in continuo utilizzati per accertare il rispetto dei limiti di emissione al di sotto dei 50 mg/m^3 in flussi gassosi convogliati. Il documento è stato sviluppato principalmente per gli inceneritori, ma da un punto di vista tecnico può essere applicabile anche ad altre tipologie di impianti.

4.3.7 UNI EN 14181:2005: Assicurazione della qualità di sistemi di misurazione automatici.

La Norma UNI EN 14181 definisce una serie di procedure per il controllo di qualità di un Sistema di Monitoraggio in Continuo (Automated Measurement System - AMS) allo scopo di soddisfare i requisiti di incertezza sui valori misurati dati dalla legislazione europea (Direttive UE) e nazionale o più in generale dalle autorità competenti.

Per raggiungere questo obiettivo sono state definite tre procedure corrispondenti ad altrettanti differenti livelli di controllo di qualità, detti QAL (Qualità Assurance Level – QAL1, QAL2, QAL3).

Questi livelli hanno lo scopo di procedere alla validazione del sistema di monitoraggio, una volta installato, di svolgere controlli di verifica durante il suo servizio sull'impianto.

In particolare:

- la QAL1 è una certificazione di qualità del prodotto e indica l'idoneità di un AMS a una prevista applicazione attraverso un test in accordo alla UNI EN ISO 14956;
- la QAL2 è una certificazione di qualità del sistema che viene rilasciato da un ente terzo accreditato dopo l'installazione in situ, e fa riferimento all'accuratezza della misura per confronto con un sistema di misura automatico di riferimento (SRM) in seguito ad un'opportuna calibrazione;
- la QAL 3 è una certificazione di qualità che indica la capacità del sistema di effettuare misure di deriva sia dallo zero sia dal fondo scala e, quindi, di autoresettarsi o allarmare l'anomalia;
- la procedura per il controllo annuale (AST) dell'AMS è finalizzata a valutare sia che l'AMS funzioni correttamente e le sue prestazioni continuino ad essere valide e sia che la funzione di calibrazione e la variabilità calcolate attraverso la QAL2 continuino ad essere accettabili.

5. Strumenti in commercio adatti all'uso

Per poter verificare la fattibilità tecnica per l'implementazione di una strumentazione atta al monitoraggio delle polveri da emissioni convogliate bisogna innanzi tutto definire sia le condizioni di progetto cui lo strumento debba sottostare sia la distribuzione granulometrica delle particelle solide emesse dai fumi. Inoltre gli strumenti atti allo scopo devono avere tutte le caratteristiche di assicurazione della qualità del dato dettate dalle norme UNI EN 13284-2 e UNI EN 14181, e essere certificata ATEX.

5.1 Condizioni fluidodinamiche del camino

Dal manuale SME dell'impianto FCC CO Boiler e dallo studio per il monitoraggio delle emissioni, eseguito negli anni precedenti del camino, fornitoci dalla Raffineria, si sono rilevate le caratteristiche dimensionali del camino (riportate nella tabella 1) e quelle fluidodinamiche (riportate nella tabella 2).

Tab. 1: Parametri dimensionali del camino

Altezza camino	>50,0 m
Diametro esterno camino	>5,0 m
Diametro interno camino	4,8 m

Tab. 2: Parametri fluidodinamici del camino

Parametro	Min	Max
Portata fumi secchi al 3% di O ₂ (Nm ³ /h)	246.240,0	407.676,0
Temperatura fumi (°C)	283,0	401,0
O ₂ (%)	1,6	3,9
Polveri (mg/Nm ³)	16,0	85,9
Concentrazione SO ₂ (mg/Nm ³)	80,0	455,0
Concentrazione NO _x (mg/Nm ³)	175,0	339,0
Concentrazione CO ₂ (mg/Nm ³)	12,3	13,5
Concentrazione CO (mg/Nm ³)	< 1,0	5,0

Essendo i valori misurati dallo SME in condizioni normali ossia a T = 273,15 K si sono ricalcolati tutti i valori nelle condizioni reali e riportati in tabella 3.

Da questi valori di portata misurati in m³ è stata determinata la velocità reale massima e minima dei fumi. Per semplicità si è scelto di trascurare la normalizzazione in funzione dell'O₂%, visto che la quantità misurata è, nella maggior parte dei casi, vicina a quella di riferimento, e dell'Umidità %, vista che la quantità misurata è poco variabile e mediamente prossima al 5%.

I parametri di progetto sono stati di seguito scelti assumendo che lo strumento debba poter lavorare regolarmente alle condizioni più estreme, e cioè riferite al valore di massima portata e massima temperatura e di minima portata e minima temperatura, da cui segue rispettivamente la massima e la minima velocità dei fumi durante il funzionamento.

Tab. 3: Parametri non normalizzati nelle condizioni più estreme e della media

Parametro	Min	Media	Max
Portata fumi secchi (m ³ /h)	501.499,77	753.997,37	1.006.494,97
Temperatura fumi (°C)	283,00	342,00	401,00
Velocità dei fumi (m/s)	7,61	11,45	15,30
Polveri (mg/m ³)	7,86	21,33	34,80

I parametri di progetto, nel caso in specie, devono inoltre tener conto che la temperatura, la portata, e la velocità possano avere oscillazioni più ampie di quelle misurate durante un precedente studio di monitoraggio delle emissioni, in quanto trattasi di misure occasionali e non ricavate da dati in continuo dal DCS di impianto. Per tale ragione i parametri si è deciso di ampliare il range di lavoro e di conseguenza si è scelto di moltiplicare i valori minimi di un fattore 0,75 e i valori massimi di un fattore di 1,25.

Per cui, arrotondando in sicurezza i dati ottenuti, si riportano i parametri di progetto, riportati in tabella 4, che saranno il riferimento per la scelta dello strumento da utilizzare, da realizzare o da adeguare, per la misurazione delle polveri totali sospese.

Tab. 4: Parametri di progetto

Parametro	Min	Max
Portata fumi secchi (m ³ /h)	375.000,00	1.250.000,00
Temperatura fumi (°C)	200,00	480,00
Velocità dei fumi (m/s)	5,50	18,50
Polveri (mg/m ³)	5,00	45,00

Inoltre questo strumento, dovendo lavorare in ambiente con elevato rischio incendio, deve essere certificato ATEX e, viste la tipologia dei fumi e delle particelle solide, deve anche essere resistente all'abrasione e alla corrosione.

5.2 Granulometria del particolato emesso dal camino

La distribuzione granulometrica è anch'essa un parametro da tenere presente per la scelta della strumentazione più adatta allo scopo.

Questa si è ricavata dai dati ottenuti dalle campagne di monitoraggio del particolato emesso dallo stesso camino durante gli anni passati e in particolare per la misurazione del PTS, PM10, PM2,5.

Da questo si è ricavata una distribuzione granulometrica seppur sono nelle tre classi dimensionali essendo il PTS il particolato totale sospeso, il PM10 il particolato con diametro delle particelle minore di 10 µm e il PM2,5 il particolato minore di 2,5 µm.

In tabella si riportano i dati delle frazioni misurate durante i monitoraggi e, fatte le opportune operazioni, e la quantità percentuale in peso per ogni frazione granulometrica.

Per una visualizzazione globale dei dati si riporta anche il grafico delle distribuzioni granulometriche come percentuale in peso.

Tabella 5: valori del particolato atmosferico misurato negli anni passati

	PTS	PM10	PM2,5	Frazioni Granulometriche (% w/w)		
	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³	d < 10 µm	10 < d < 2,5 µm	d < 2,5 µm
1	51,4	50,0	35,8	2,7	27,6	69,6
2	85,9	54,9	38,2	36,1	19,4	44,5
3	70,8	50,0	35,7	29,4	20,2	50,4
4	69,3	51,6	36,6	25,5	21,6	52,8
5	16,0	14,4	9,5	10,0	30,6	59,4
6	20,4	20,1	13,7	1,5	31,4	67,2
	18,4	17,9	14,1	2,7	20,7	76,6
8	18,3	17,5	12,5	4,4	27,3	68,3
9	44,7	31,5	25,1	29,5	14,3	56,2
10	42,5	34,3	29,6	19,3	11,1	69,6
11	39,2	33,0	26,1	15,8	17,6	66,6
12	42,1	32,9	26,9	21,9	14,3	63,9
13	45,7	45,2	37,6	1,1	16,6	82,3
14	46,4	45,7	39,6	1,5	13,1	85,3
15	43,6	43,0	38,4	1,4	10,6	88,1
16	45,2	44,7	38,5	1,1	13,7	85,2
17	47,8	33,8	28,1	29,3	11,9	58,8
18	43,8	31,1	25,3	29,0	13,2	57,8
19	40,0	32,9	27,1	17,8	14,5	67,8
20	34,1	27,0	22,5	20,8	13,2	66,0
21	36,9	27,1	20,4	26,6	18,2	55,3
22	34,6	29,1	20,9	15,9	23,7	60,4
23	35,2	27,7	21,3	21,3	18,2	60,5
Min	16,0	14,4	9,5	1,1	10,6	44,5
Max	85,9	54,9	39,6	36,1	31,4	88,1
Media	42,3	34,6	27,1	15,8	18,4	65,8

Dall'esito di questa analisi si è dedotto che la frazione granulometrica che contribuisce maggiormente sulla quantità in peso delle polveri emesse dal camino è quella con diametro $d < 2,5 \mu\text{m}$. Infatti, anche dal diagramma a torta sulla media dei risultati sotto riportato, si evince che la frazione granulometrica con $d < 2,5 \mu\text{m}$ contribuisce alla quantità in peso delle polveri emesse per circa il 66%.

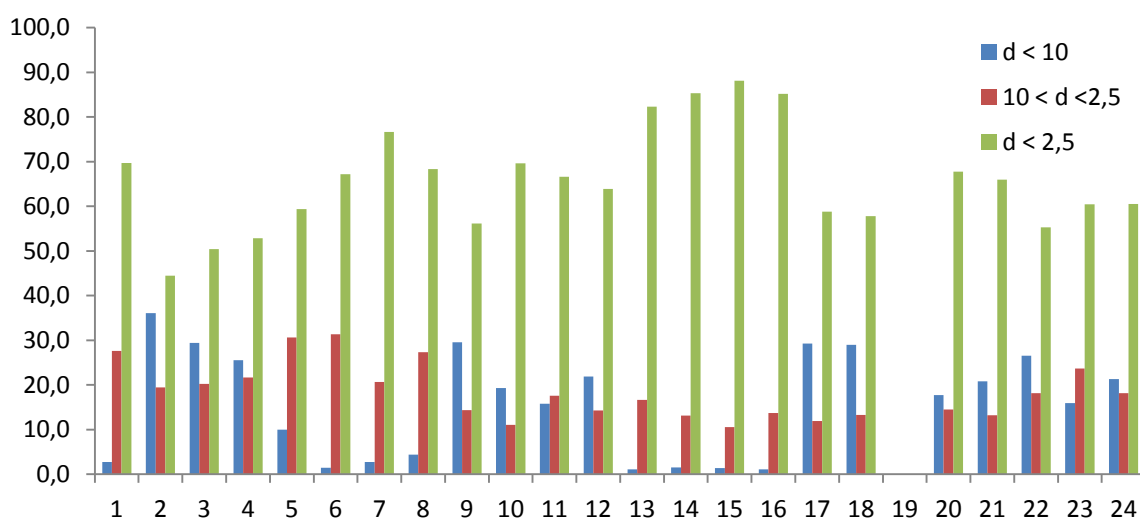


Figura 10: Distribuzione granulometrica percentuale delle particelle nelle tre classi dimensionali

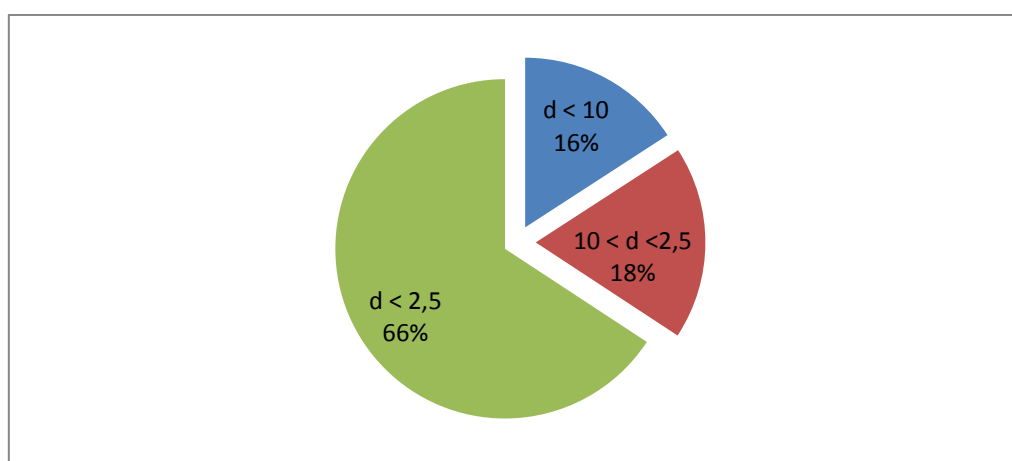


Figura 11: Distribuzione granulometrica media percentuale delle particelle nelle tre classi dimensionali

5.3 Parametri di progetto

Da tutto quanto detto nei precedenti paragrafi si sono desunti i seguenti parametri di progetto nonché le caratteristiche tecniche dello strumento:

- portata dei fumi compresa tra 375.000 e 1.250.000 m³/h
- velocità dei fumi compresa tra 5,5 e 18,5 m/s
- range di misura almeno da 0,1 a 200 mg/Nm³;
- temperatura di esercizio sino a 480°C;
- sensibilità < 0,1 mg/Nm³;
- granulometria delle particelle comprese tra 0,1 e 100 µm con maggiore attenzione alle particelle sotto 2,5 µm
- stabilità termica ambientale (possibilità di operare tra -10 e +70 °C senza derive significative sull'amplificazione)
- tenuta stagna (IP65);
- insensibilità alle variazioni della tensione di alimentazione (± 20%);
- facilità di calibrazione (auto set della sensibilità ad auto-apprendimento);
- auto diagnosi (la sonda dovrebbe eseguire periodicamente e in modo automatico un test funzionale, denunciando eventuale carenza di sensibilità e mancanza di isolamento della sonda);
- facilità di montaggio e smontaggio (semplicità della manutenzione);
- segnalazione di allarme per il superamento di un valore istantaneo;
- segnalazione di allarme per il superamento di un valore medio (valutazione, dopo calibrazione, delle effettive emissioni espresse in mg/Nm³);
- Certificazione ATEX e CE
- Certificazione QAL1; QAL2; QAL3

6. Studio di fattibilità

Uno studio di fattibilità definisce se un progetto, o un'idea, è realizzabile sia dal punto di vista tecnico sia da quello economico e pertanto questi due aspetti verranno trattati separatamente.

6.1 Fattibilità tecnica

Dall'esame della documentazione acquisita e dai parametri di progetto ricavati si ritiene che le strumentazioni più adatte allo scopo sono quelle che fanno uso di sonde elettrodinamiche e/o di sonde per laser scattering per cui di seguito si discutono i motivi principali della loro scelta.

6.1.1 Sonde elettrodinamiche

Vista la elevata velocità dei fumi nel camino, le particelle solide aerotrasportate tendono facilmente, per sfregamento tra loro e/o per attrito con il fluido, ad accumulare cariche elettriche sulla loro superficie. Pertanto, si ritiene che le sonde elettrodinamiche possano rispondere efficacemente e con una buona sensibilità alla misurazione della concentrazione delle polveri.

Il principio di funzionamento, come già accennato nel paragrafo precedente, risiede proprio nella capacità di queste sonde di misurare la frequenza della corrente indotta dalle particelle quando passano vicino l'elettrodo, mentre la corrente continua generata per impatto delle particelle viene filtrata ed eliminata. Proprio per il fatto che le particelle non devono impattare contro l'elettrodo per registrare un segnale, questa tecnica non è sensibile né allo sporco né al deterioramento della superficie dell'elettrodo.

Questa sonda/elettrodo, scelta delle opportune dimensioni in funzione del diametro del camino, è generalmente costituita da un'asta (l'elettrodo) in acciaio AISI 316 che è facilmente, rapidamente pulibile ed economicamente sostituibile quando molto logora.

Il segnale misurato viene elaborato dall'elettronica della sonda, e dopo le opportune procedure di settaggio dello strumento, è in grado di correlare questa grandezza con la quantità in peso delle polveri misurate con il metodo estrattivo riportato dalla normativa UNI EN 13284-1.

La correlazione di queste due misure è tanto più stretta quanto più le condizioni fluidodinamiche del camino sono omogenee. Infatti qualora il camino sia molto grande, e/o le caratteristiche fluido dinamiche dei fumi non siano perfettamente omogenee lungo la sezione di misura, si possono usare anche due o più sonde collegate allo stesso controller (Multicontroller).

Uno svantaggio di questa tecnica sta nel fatto che essa è sensibile alla variazione della tipologia delle particelle solide ma, nel caso in specie, visto che le particelle sono sempre dello stesso tipo “zeolite” si ritiene che questo limite sia ininfluenza.

Si precisa comunque che un radicale cambio del catalizzatore usato durante il processo, che è il responsabile delle polveri, potrebbe delineare una variazione del segnale che non si correlerebbe bene con la quantità in peso delle polveri e pertanto, in tal caso, è necessario rieseguire una nuova calibrazione. Questo procedimento di ricalibrazione dello strumento dovrebbe far parte di una procedura tecnica da implementare nel manuale SME ogni qualvolta viene reintegrato il nuovo catalizzatore nel processo produttivo.

L'indagine di mercato svolta ha messo in evidenza che esistono già in commercio sonde elettrodinamiche idonee allo scopo e sono commercializzate ad esempio dalla società *Ital Control Meters*, PCME. A titolo di esempio è presente sul mercato uno strumento prodotto dalla Ital Control Meters chiamato QAL991 che risponde alle caratteristiche progettuali. Inoltre questo strumento è già in possesso della certificazione QAL1, così come richiesto dalla commissione IPPC, e della certificazione ATEX.

Questa sonda trova applicazioni: nei camini da impianti inceneritori, impianti di produzione di energia, grossi impianti di combustione quali ad esempio forni di cottura cemento, centrali a carbone e nel camino del CO Boiler di altre Raffineria italiane.

Le caratteristiche tecniche di questa tipologia di strumento e i vantaggi/svantaggi sono:

<i>Caratteristiche Tecniche</i>
Diametro camino da 0,3 a 10 m
Livello minimo misurabile < 0,1 mg/m ³
Risoluzione di misura 0,01 mg/m ³
Range di misura 0 – 1.000 mg/m ³
Limite di temperatura dei fumi 500 °C
Lunghezza asta 800 mm
Materiale asta acciaio AISI 316 con isolamento in peek o sialon per alte temperature
Aria di pulizia 30 l/min (opzionale)
Certificato QAL1 e ATEX sino a 400 °C

<i>Vantaggi</i>	<i>Svantaggi</i>
Insensibile alle variazioni di velocità quando sopra i 5 m/s	Scostamento dalla linearità quando la velocità dei fumi scende sotto i 5 m/s
Buona rappresentatività della misura	Sensibile alla variazione della tipologia delle particelle
Insensibile allo sporcamento	
Montaggio semplice e flessibile	
Manutenzione ridotta al minimo	
Facile da calibrare	
Utilizzabile in applicazioni "umide"	
Sensibilità e precisione eccellenti	
Ottimale in applicazioni da filtri a maniche	
Certificato (IPPC / EN 14181 QAL1)	

6.1.2 Sonda Laser Scattering in diffrazione frontale

Un'altra tecnica che risponde efficacemente alle esigenze progettuali di questo studio è quella che vede l'uso della misurazione delle polveri per diffrazione frontale della luce. Questa tecnica, già spiegata nei paragrafi precedenti, trova una facile e vantaggiosa applicazione quando la sorgente luminosa e il rilevatore sono solidali tra loro e pertanto non necessitano di delicate procedure di allineamento tra il laser e il rilevatore.

Da un'indagine di mercato è emerso che le società DURAG, PCME, Ital Control Meters, hanno ideato un sistema che soddisfa i suddetti requisiti accoppiando la sorgente laser e il rilevatore in una stessa sonda (tubo in acciaio cavo).

Questa sonda è stata ideata in modo tale che dallo stesso lato vi è sia la sorgente laser sia il rilevatore. Il rilevatore raccoglie infatti il segnale diffratto in avanti dalle particelle dopo essere stato riflesso indietro da una lente a specchio concavo che cattura i raggi diffratti a pochissimi gradi di distanza dal centro focale del laser.

Come si può vedere dalla figura sotto le particelle in grado di generare una diffrazione della luce laser sono solo quelle che attraversano il cammino ottico che è solo qualche centimetro.

Questo strumento, dunque, risponde tanto meglio quanto più le condizioni fluidodinamiche dei fumi che attraversano il camino siano omogenee.

Come tutte le strumentazioni che usano la diffrazione della luce anche questa sonda è sensibile allo sporcamento delle lenti e di conseguenza è necessario l'utilizzo di una sorgente d'aria in continuo per mantenerle efficaci e pulite.

Questa sonda trova il suo impiego in impianti tipo: inceneritori, impianti di produzione di energia elettrica, grossi impianti di combustione, forni di cementerie, forni di produzione del vetro.

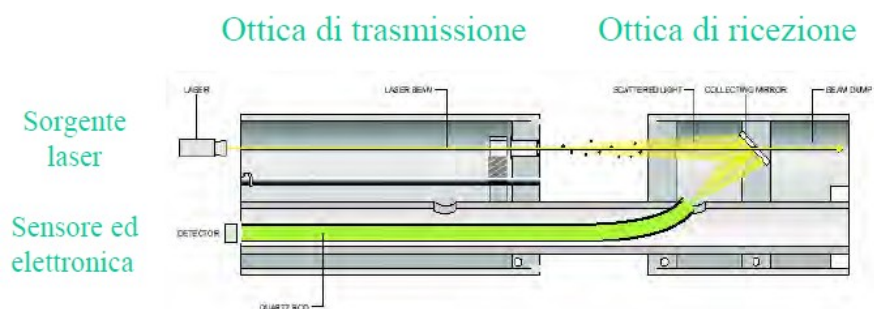


Figura 12: Schema di funzionamento di una sonda laser per diffrazione frontale della luce

Le caratteristiche tecniche di questa tipologia di strumento e i vantaggi/svantaggi sono:

<i>Caratteristiche Tecniche</i>
Diametro camino da 0,3 a 7 m
Livello minimo misurabile < 0,1 mg/m ³
Risoluzione di misura 0,01 mg/m ³
Range di misura 0 – 200 mg/m ³
Limite di temperatura dei fumi 500 °C
Lunghezza asta da 800 a 1400 mm
Materiale asta acciaio AISI 316 con isolamento in peek o sialon per alte temperature
Aria di pulizia 30 l/min
Certificato QAL1 e ATEX sino a 400 °C

<i>Vantaggi</i>	<i>Svantaggi</i>
Insensibile alla variazione della tipologia delle particelle	Piccoli volumi di analisi
Buona rappresentatività della misura	Sensibile allo sporcamento
Montaggio semplice e flessibile	Aria di pulizia necessaria
Facile da calibrare	Manutenzione nello standard
Sensibilità e precisione eccellenti	
Certificato (IPPC / EN 14181 QAL1)	

Così come tutti i metodi di misura indiretta delle polveri, anche questa tecnica necessita di una procedura di calibrazione che metta in relazione la misura ottica con la quantità in peso delle polveri.

La commercializzazione della sonda è anch'essa distribuita per il mercato italiano dalla Ital Control Meters. Questo strumento è anche certificato QAL1 e ATEX.

La misura per diffrazione laser ha il vantaggio, rispetto la sonda elettrodinamica, di essere indipendente dalla tipologia del particolato ma ha lo svantaggio che risponde meglio a velocità meno elevate. Seppur il limite di rilevabilità delle polveri di questo strumento sia ben sotto della quantità minima di polveri misurate (confr. Tab. 3 - parametri di progetto) è tanto più affidabile quanto più è omogenea la distribuzione delle particelle in considerazione che il cammino ottico del laser è solo di qualche centimetro.

Questa sonda, costruita in acciaio AISI 316, è anche dotata di un sistema di lavaggio ad aria compressa che è necessaria per eliminare le particelle che si depositano nelle finestre delle fenditure.

6.1.3 *Ottenimento della QAL2*

I suddetti strumenti hanno già la certificazione QAL1 ma, così come richiesto dalla commissione IPPC, devono anche essere in possesso di certificazione di tipo QAL2 e QAL3 affinché le misure possano essere validate.

Lo sviluppo e l'attuazione delle procedure QAL2 e AST implicano l'intervento di laboratori esterni mentre la procedura QAL3 è attuata dal gestore dell'impianto.

I laboratori preposti ad effettuare le misure con lo *standard reference material* SRM devono essere dotati di un sistema accreditato in accordo con la EN ISO/IEC 17025, o devono essere riconosciuti dalle autorità competenti.

La QAL 2 è una procedura sviluppata per la determinazione della funzione di calibrazione e per la verifica della variabilità dei valori misurati dall'AMS attraverso il confronto con l'incertezza definita dal legislatore. La QAL2 deve essere applicata ad un AMS correttamente progettato e installato secondo quanto previsto dalla procedura QAL1 (EN ISO 14956). La funzione di calibrazione è ottenuta attraverso una serie di misure in parallelo con un Sistema di Riferimento (SRM - Standard Reference Method). La variabilità associata al confronto tra le misure in parallelo dei due sistemi è confrontata con l'incertezza accettabile.

La procedura QAL2 dovrà essere effettuata periodicamente, dopo modifiche sostanziali all'operatività dell'impianto, quale ad esempio il cambio della tipologia del catalizzatore, in seguito a insuccesso dell'AMS o quando richiesto dalla legislazione.

Risulta indispensabile che, al fine di minimizzare gli effetti dovuti a derive strumentali ed eventuale usura di materiali di consumo, al momento dell'esecuzione delle prove QAL2, l'AMS sia appena stato tarato e manutenzionato. Le prove coprono i seguenti aspetti:

- installazione dell'AMS (test funzionale);
- taratura dell'AMS per mezzo di misure in parallelo con SRM;
- determinazione della variabilità dell'AMS e confronto di questa con i requisiti di legge.

Le prove QAL2 vanno eseguite ogni tre anni o: i) ogni volta che vengano apportate modifiche all'impianto o alla gestione dello stesso (ad es. modifica dei sistemi di abbattimento o cambio di combustibili); ii) ogni volta che vengano apportate modifiche o riparazioni all'AMS tali da influenzare in maniera significativa le misure prodotte dal sistema stesso.

6.1.4 Conclusioni sulla fattibilità tecnica

Visto che gli impianti del tipo FCC CO-Boiler sono corredati da camini aventi diametro interno molto del grandi è opportuno utilizzare almeno due sonde contemporaneamente e in due punti diversi della stessa sezione affinché il campionamento delle polveri sia maggiormente rappresentativo e, di conseguenza, la misura più affidabile.

Vista la grande variabilità della portata dei fumi e dunque della velocità delle particelle, si ritiene che, sia opportuno installare entrambe le tipologie di sonde discusse.

Ciò è dettato proprio dalla complementarità che questi due strumenti hanno in funzione della velocità, della tipologia delle particelle e dello sporcamento.

Infatti, come già detto, la *sonda elettrodinamica* risponde molto bene alla alte velocità (> 8 m/s) risente del cambio della tipologia delle polveri e non è influenzata dallo sporcamento dell'elettrodo, al contrario, la *sonda per diffrazione di luce* risponde meglio a velocità più moderate, non risente del cambio della tipologia delle polveri ma risente molto dello sporcamento delle lenti.

Con questa configurazione si assicura una corretta misurazione delle polveri in qualsiasi condizione di funzionamento del camino. Inoltre le due misure possono rilevare, oltre il medesimo risultato, anche eventuali discrepanze che metterebbero in evidenza la necessità di una manutenzione degli strumenti o di una nuova procedura di calibrazione.

Inoltre la media dei due valori, insieme alla deviazione standard, garantirebbe certamente una maggiore correlazione tra il valore misurato ed il valore vero essendo il campionamento più rappresentativo.

6.2 Fattibilità economica

L'indagine di mercato svolta, indica che sia sul mercato nazionale sia su quello internazionale vi sono aziende specializzate nei sistemi di controllo per le emissioni in grado di fornire queste tipologie di strumentazione ritenute idonee per la misurazione delle polveri in un camino CO Boiler di una raffineria che abbia un impianto del tipo FCC.

Anche per quanto concerne le procedure per l'ottenimento della certificazione QAL2 degli strumenti di misura esistono sul mercato regionale, nazionale, numerosi laboratori accreditati ISO 17025:2005 con i requisiti richiesti dalla normativa vigente in grado di poter svolgere tutta l'attività prevista dalla normativa UNI EN 14181:2005.

7. Conclusioni

Questo studio è stato svolto con l'obiettivo di verificare se esiste una metodologia o un sistema di misurazioni in grado di misurare in continuo le polveri emesse da un camino di un impianto FCC CO Boiler.

Da quanto sopra esposto si conclude che esistono due tecniche strumentali già adottate in impianti con caratteristiche simili per temperatura, pressione, granulometria delle particelle, abrasività delle particelle, a quelle del camino da noi studiato.

In conclusione il sistema di monitoraggio, individuato in questo studio di fattibilità, da installare in un camino di un CO Boiler deve essere composto sia da una *Sonda Elettrodinamica* sia da una *Sonda Laser Scattering in diffrazione frontale* dove la scelta di due strumenti di misura si è resa necessaria per far fronte alla notevole variabilità delle condizioni fluidodinamiche dei fumi. Il sistema di monitoraggio così pensato assicura infatti

una corretta quantificazione delle polveri in qualsiasi condizione di funzionamento del camino essendo, anche, il campionamento certamente più rappresentativo.

Inoltre i due strumenti essendo già in possesso della certificazione ATEX e QAL1 necessitano soltanto delle certificazioni QAL2 e QAL3 per rispondere alle richieste della commissione IPPC per l'ottenimento dell'AIA.

Si conclude questo studio di fattibilità affermando che il progetto di installazione di un sistema per la misurazione in continuo delle polveri emesse da un camino di un CO-Boiler di Raffineria è *realizzabile sia dal punto di vista tecnico sia dal punto di vista economico.*

Bibliografia

- AA.VV. - Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications - 3rd Edition, 2011
- G. Carminati - *Analisi delle polveri nei camini dei termovalorizzatori* - La termotecnica 12/2008
- R. Xu - *Particulate Characterization: Light Scattering Method* - Kluwer Academic Publishers, 2002
- Wiliam Averdieck - Electrodynamic Technology for Particulate Monitoring – PCME Ltd., 1999
- Kay Ramse - *The emergence of triboelectric technology* – Pollution Engineering – 1998
- C.F. Bohren, D.R. Huffman – Absorption and Scattering of Light by Small Particles – Wiley, 1983
- Linee guida dei Sistemi di Monitoraggio in Continuo delle Emissioni in atmosfera (SME);
- Manuale di gestione del sistema di monitoraggio in continuo delle emissioni Raffineria Sarlux Impianto FCC Camino 15 (CO Boiler)
- Norma UNI EN 13824-1:2005;
- Norma UNI EN 13824-2:2005;
- Norma UNI EN 14181:2005;
- Titolo III Parte II del D.Lgs. 152/06;
- Allegato II e VI alla Parte V del D.Lg. 152/06;
- Allegato II del D.M. 31/01/2005;
- <http://www.italcontrol.it/>
- <http://www.pcme.com>
- <http://www.durag.com>
- <http://www.teledyne-ml.com>